Etude du spectre d'énergie d'un tube à rayons X en fonction de la haute tension et du courant d'émission

Objectifs expérimentaux

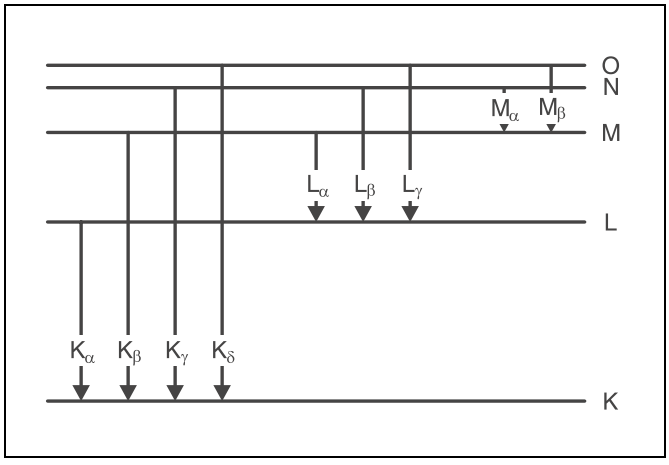
- Tracé des spectres d'énergie d'un tube à rayons X avec anode en Mo par la réflexion de Bragg du rayonnement X sur un monocristal de NaCl dans le premier ordre de diffraction.
- Interprétation des spectres d'énergie comme la superposition du spectre continu du rayonnement de freinage et des raies du rayonnement X caractéristique du matériau de l'anode.
- Etude de l'influence de la haute tension et du courant d'émission sur le rayonnement de freinage et sur le rayonnement caractéristique.

Notions de base

Le rayonnement X se produit lorsque des électrons rapides sont freinés dans la matière sur une distance réduite. Conformément aux lois de l'électrodynamique classique, un rayonnement électromagnétique est généré lors du freinage; ce rayonnement est essentiellement émis perpendiculairement à la direction de l'accélération, ici donc, perpendiculairement à la direction des électrons qui incident sur l'anode pour des énergies électroniques inférieures à 50 keV. Cette part du rayonnement X est ainsi appelée rayonnement de freinage. Le rayonnement de freinage a un spectre continu qui s'étend jusqu'à une fréquence maximale ν_{max} précise ou une longueur d'onde minimale λ_{min}.

Si l'énergie des électrons est au-delà d'une valeur limite, le rayonnement X caractéristique survenant dans le spectre sous forme de raies individuelles est excité en plus du rayonnement de freinage continu. Il résulte du fait que des électrons riches en énergie pénètrent bien profondément dans les cortèges électroniques du matériau de l'anode où ils éjectent par collisions des électrons des couches proches du noyau. Les trous ainsi formés sont remplis par émission de rayonnement X par des électrons issus des couches extérieures du cortège électronique. Le rayonnement X est typique du matériau de l'anode et correspond à peu près au spectre de raies optique d'une substance à l'état gazeux ou à l'état de vapeur. Les solides émettent eux aussi des raies individuelles, définies avec netteté, dont la position dépend à peine de l'environnement chimique des atomes émetteurs ou de l'état physique de la substance, contrairement à ce qu'il en est pour la lumière visible générée dans les couches extérieures du cortège électronique.

Fig. 1 Diagramme énergétique simplifié d'un atome et définition des séries K, L et M du rayonnement X caractéristique



La fig. 1 illustre la nomenclature adaptée au modèle de couches du cortège électronique pour les raies du rayonnement X caractéristique: Les couches sont caractérisées par une énergie de liaison déterminée et sont désignées de l'intérieur vers l'extérieur par les lettres K, L, M, N, etc.. Entre les couches, des transitions coïncidant avec les lois de la mécanique quantique sont possibles; suivant la direction, elles sont associées à l'absorption ou à l'émission de rayonnement. Il se manifeste ici, par exemple, un rayonnement issu des transitions vers la couche K sous la forme d'une série de raies voisines désignées par K_α, K_β, K_γ, etc. En partant de K_α, l'énergie des transitions augmente tandis que la longueur d'onde correspondante diminue en conséquence.

Dans l'expérience, on trace le spectre d'énergie d'un tube à rayons X avec anode en molybdène. Un goniomètre avec un cristal de NaCl et un tube compteur de Geiger-Müller en disposition de Bragg sert de spectromètre. Le cristal et le tube compteur sont orientés dans un couplage 2ϑ par rapport au rayonnement X incident (cf. fig. 2).

Matériel

1 appareil à rayons X	554 811
1 tube compteur à fenêtre pour rayonnements α, β, γ et X	559 01

Supplément:

1 PC avec Windows 95/98 ou Windows NT

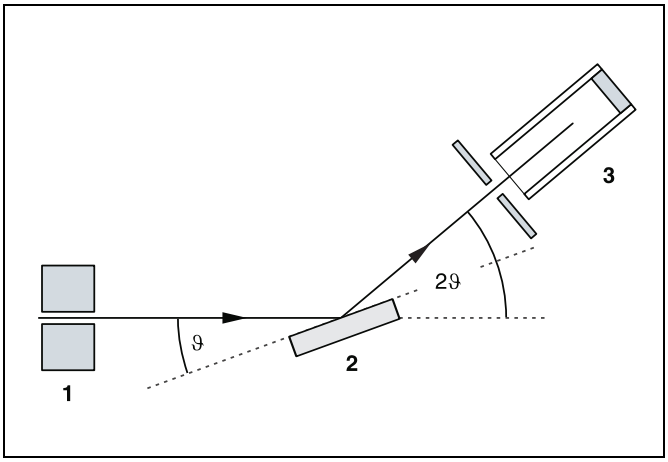


Fig. 2 Schéma de principe pour la diffraction de rayons X sur un monocristal et pour le couplage 2ϑ entre l'angle du tube compteur et l'angle de diffusion (angle de brillance)
1 collimateur, **2** monocristal, **3** tube compteur

Conformément à la loi de la réflexion de Bragg, la longueur d'onde

$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta$ (I).

d = 282,01 pm: écartement des plans du réseau du NaCl

correspond à l'angle de diffusion ϑ dans le premier ordre de diffraction.

A partir de (I), on peut calculer l'énergie du rayonnement X à l'aide des rapports valables pour le rayonnement électromagnétique

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{(II)}$$

ν: fréquence, *c:* vitesse de la lumière

et

$E = h \cdot \nu$ (III)

E: énergie, *h:* constante de Planck

Le spectromètre fournit donc suivant la représentation le spectre de longueur d'onde, le spectre de fréquence ou le spectre d'énergie du rayonnement.

On étudie l'influence de la haute tension U du tube et du courant d'émission I sur le spectre d'énergie du tube à rayons X. La haute tension U est appliquée comme tension d'accélération des électrons entre la cathode et l'anode (voir fig. 3). Le courant d'émission I, soit le courant circulant entre la cathode et l'anode, est réglable par changement de la tension de chauffage U_K de la cathode.

Conseils de sécurité

L'appareil à rayons X respecte les consignes relatives à la construction d'un appareillage à rayons X pour l'enseignement et d'un appareil à protection totale et est homologué en tant que tel (d'après le règlement allemand sur les rayonnements X).

Grâce aux mesures de protection et de blindage incorporées par le constructeur, le taux de dose hors de l'appareil est réduit à moins de 1 μSv/h, une valeur d'un ordre de grandeur correspondant à la dose d'irradiation naturelle.

- Avant la mise en service, s'assurer du bon état de l'appareil à rayons X et vérifier que la haute tension est bien coupée à l'ouverture des portes coulissantes (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- Tenir l'appareil à rayons X à l'abri des personnes non autorisées.

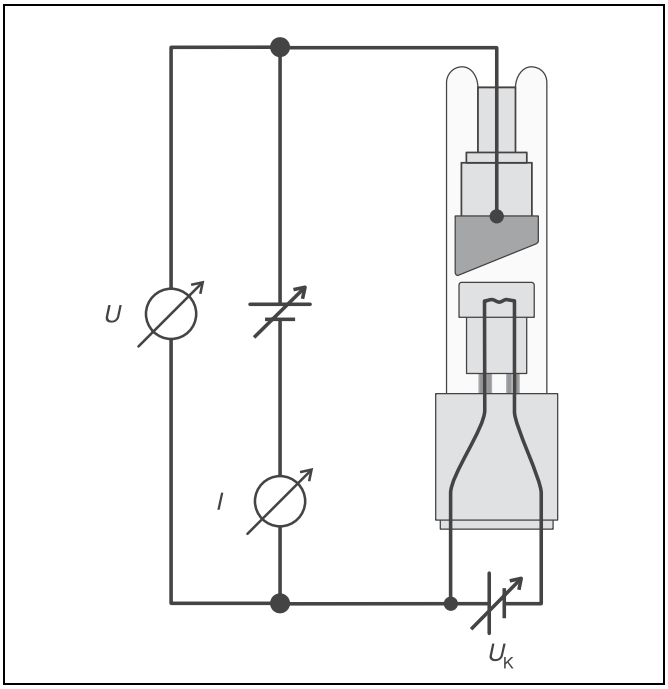
Eviter une surchauffe de l'anode dans le tube à rayons X Mo.

- A la mise en marche de l'appareil à rayons X, vérifier si le ventilateur dans la partie tube fonctionne.

Le goniomètre s'ajuste exclusivement par le biais de moteurs pas à pas électriques.

- Ne pas bloquer le bras de cible et le bras de capteur du goniomètre et ne pas modifier le réglage par force.

Fig. 3 Schéma de principe pour le montage du tube à rayons X



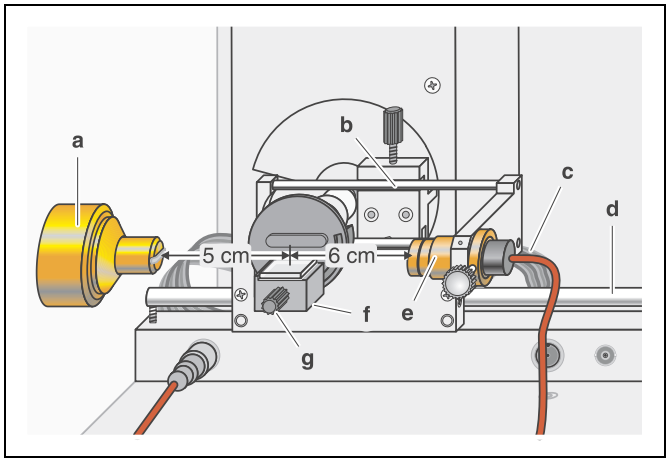


Fig. 4 Montage expérimental pour l'étude du spectre d'énergie d'un tube à rayons X

Montage

Réalisation de la disposition de Bragg:

Certains détails importants pour le montage expérimental sont représentés sur la fig. 4. La marche à suivre est la suivante (voir aussi mode d'emploi de l'appareil à rayons X):

- Placer le collimateur dans le logement du collimateur **(a)** (faire attention à la rainure de guidage).
- Fixer le goniomètre sur les barres de guidage **(d)** de manière à avoir une distance s_1 d'environ 5 cm entre le diaphragme à fente du collimateur et le bras de cible. Enficher le câble plat **(c)** pour la commande du goniomètre.
- Enlever le capuchon protecteur du tube compteur à fenêtre, placer le tube compteur à fenêtre dans le logement du capteur **(e)** et brancher le câble du tube compteur à la douille GM-Tube.
- En déplaçant le porte-capteur **(b)**, régler une distance s_2 d'environ 6 cm entre le bras de cible et le diaphragme à fente du logement pour capteur.
- Monter le porte-cible avec le plateau pour cible **(f)**.
- Desserrer la vis moletée **(g)**, poser le cristal de NaCl à plat sur le plateau pour cible, soulever prudemment le plateau pour cible avec le cristal jusqu'à la butée et serrer la vis moletée en faisant bien attention (visser bien dans l'axe).
- Eventuellement ajuster la position zéro du goniomètre (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).

N.B.:

Les cristaux de NaCl sont hygroscopiques et fragiles:

Ranger le cristal dans un endroit aussi sec que possible, éviter si possible toute sollicitation mécanique sur le cristal, ne s'emparer du cristal que par les fronts.

Si le taux de comptage est trop faible, la distance s_2 entre la cible et le capteur peut être légèrement réduite sans pour autant finir par être trop petite sous peine d'avoir une résolution angulaire du goniomètre qui ne suffirait plus pour la séparation des raies caractéristiques K_α et K_β.

Préparation de l'acquisition des valeurs mesurées avec le PC:

- Relier la sortie RS232 et le port série du PC (en principe COM1 ou COM2) via le câble V24 à 9 pôles (livré avec l'appareil à rayons X).
- Eventuellement installer le programme «Appareil à rayons X» sous Windows 95/98/NT (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X) puis sélectionner la langue désirée.

Réalisation

a) Variation de la haute tension du tube

- Appeler le programme «Appareil à rayons X», vérifier que l'appareil à rayons X est bien branché et éventuellement effacer les données de mesure existantes avec le bouton ou la touche F4.
- Régler un courant d'émission I = 1,00 mA, un temps de mesure par pas angulaire Δt = 10 s et un pas de progression angulaire $\Delta\beta$ = 0,1°.
- Activer le bouton-poussoir Coupled pour le couplage 2ϑ de la cible et du capteur puis régler la valeur limite inférieure de l'angle de la cible sur 2,5° et la valeur limite supérieure sur 12,5°.
- Sélectionner une haute tension du tube U = 15 kV puis lancer la mesure et la transmission des données vers le PC avec le bouton-poussoir SCAN.
- Enregistrer des séries de mesures supplémentaires avec les hautes tensions du tube U = 20 kV, 25 kV, 30 kV et 35 kV.

Pour la représentation en fonction de la longueur d'onde, ouvrir la fenêtre de dialogue avec le bouton ou la touche F5 et inscrire l'écartement des plans du réseau du NaCl.

Enregistrer toutes les séries de mesures ensemble sous un nom approprié à l'aide du bouton ou de la touche F2.

b) Variation du courant d'émission:

Effacer les données de mesure avec le bouton ou la touche F4 et régler une haute tension du tube U = 35 kV.

- Sélectionner un courant d'émission I = 0,40 mA puis lancer la mesure et la transmission des données vers le PC avec le bouton-poussoir Scan.
- Enregistrer des séries de mesure supplémentaires avec les courants d'émissions I = 0,60 mA, 0,80 mA et 1,00 mA.
- Ouvrir la fenêtre de dialogue pour la représentation en fonction de la longueur d'onde avec le bouton ou la touche F5 et inscrire l'écartement des plans du réseau du NaCl.
- Enregistrer toutes les séries de mesures ensemble sous un nom approprié à l'aide du bouton ou de la touche F2.

Exemple de mesure

a) Variation de la haute tension du tube:

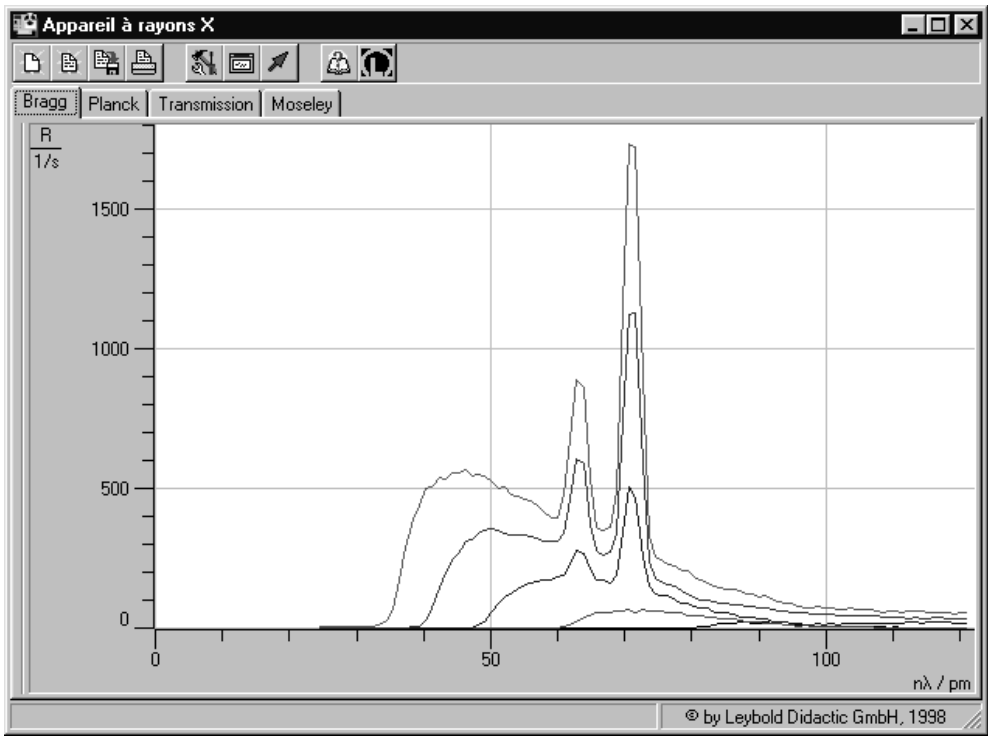


Fig. 5 Spectres du tube à rayons X Mo pour les hautes tensions du tube U = 15 kV (en bas), 20 kV, 25 kV, 30 kV, 35 kV (en haut); courant d'émission I = 1 mA

b) Variation du courant d'émission:

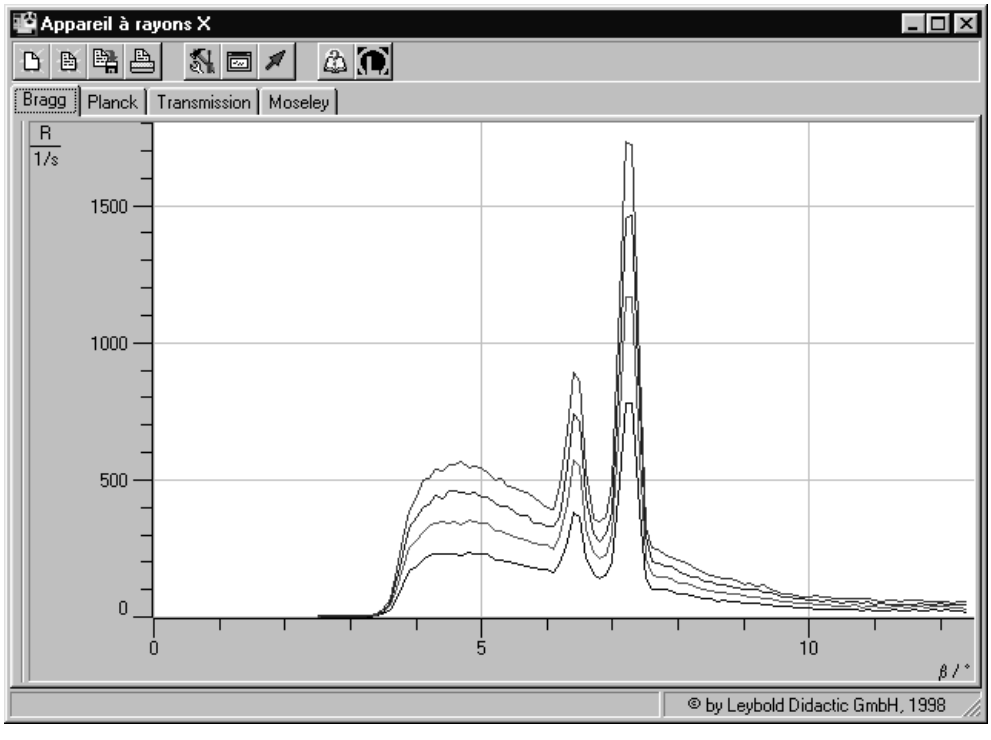


Fig. 6 Spectres du tube à rayons X Mo pour les courants d'émission I = 0,4 mA (en bas), 0,6 mA, 0,8 mA, 1,0 mA (en haut); haute tension du tube U = 35 kV

Exploitation

a) Variation de la haute tension du tube:

– Charger la série de mesures enregistrée.
– Appeler à chaque fois le menu d'exploitation du programme «Appareil à rayons X» en cliquant dans le graphe avec le bouton droit de la souris, sélectionner le point de menu «Calcul valeur principale du pic» et marquer un pic sur «toute sa largeur» avec le bouton gauche de la souris.
– Noter les valeurs principales dans un tableau de mesure (voir tableau 1) et calculer les valeurs moyennes.

Tab. 1: Certaines longueurs d'ondes du rayonnement caractéristique du molybdène tirées des spectres pour une variation de la haute tension *U* du tube

$\frac{U}{kV}$	$\frac{\lambda(K_\alpha)}{pm}$	$\frac{\lambda(K_\beta)}{pm}$
25	71,04	62,13
30	71,09	63,14
35	71,04	63,10

Valeurs moyennes:

$\lambda(K_\alpha)$ = 71,06 pm, $\lambda(K_\beta)$ = 63,12 pm

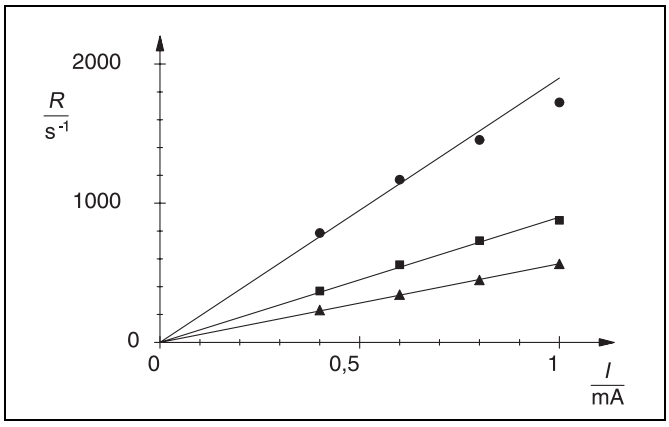
Valeurs littéraires [1] à titre de comparaison:

$\lambda(K_\alpha)$ = 71,080 pm, $\lambda(K_\beta)$ = 63,095 pm

b) Variation du courant d'émission:

– Charger la série de mesures enregistrée.
– Appeler à chaque fois le menu d'exploitation du programme «Appareil à rayons X» en cliquant dans le graphe avec le bouton droit de la souris, sélectionner le point de menu «Calcul valeur principale du pic» et marquer un pic sur «toute sa largeur» avec le bouton gauche de la souris.
– Noter les valeurs principales dans un tableau de mesure (voir tableau 2) et calculer les valeurs moyennes.
– Sélectionner en plus le point de menu «Afficher les coordonnées», déterminer les maxima $R(K_\alpha)$ et $R(K_\beta)$ des raies caractéristiques et le maximum du spectre continu du rayonnement de freinage R_C puis noter les valeurs obtenues (voir tableau 3) et les représenter graphiquement (voir fig. 7).

Fig. 7 Maxima de taux de comptage en fonction du courant d'émission
Cercles: raie K_α
Carrés: raie K_β
Triangles: spectre continu du rayonnement de freinage



Tab. 2: Certaines longueurs d'ondes du rayonnement caractéristique du molybdène tirées des spectres pour une variation du courant d'émission *I*

$\frac{I}{mA}$	$\frac{\lambda(K_\alpha)}{pm}$	$\frac{\lambda(K_\beta)}{pm}$
0,4	71,09	63,15
0,6	71,05	63,15
0,8	71,08	63,15
1,0	71,04	63,10

Valeurs moyennes:

$\lambda(K_\alpha)$ = 71,07 pm, $\lambda(K_\beta)$ = 63,14 pm

Tab. 3: Maxima de taux de comptage des raies caractéristiques et du spectre continu du rayonnement de freinage en fonction du courant d'émission *I*

$\frac{I}{mA}$	$\frac{R(K_\alpha)}{s^{-1}}$	$\frac{R(K_\beta)}{s^{-1}}$	$\frac{R_C}{s^{-1}}$
0,4	786	369	232
0,6	1169	558	343
0,8	1455	731	448
1,0	1724	877	564

Résultats

a) Variation de la haute tension du tube

Dans la fig. 5, on voit nettement que le spectre continu du rayonnement de freinage change au fur et à mesure que la haute tension *U* du tube augmente: L'intensité du rayonnement augmente étant donné que les électrons génèrent plus de quanta de rayons X au fur et à mesure que l'énergie augmente lors du freinage dans le matériau de l'anode. La longueur d'onde limite λ_{min} se décale alors vers des valeurs plus petites, c.-à-d. qu'un rayonnement plus riche en énergie, «plus dur» est généré. Pour l'étude quantitative du rapport entre la longueur d'onde limite et la haute tension du tube, voir expérience P6.3.3.3!

Un minimum d'énergie des électrons est nécessaire pour l'excitation du rayonnement caractéristique. Les raies K_α et K_β ne se distinguent donc qu'au-dessus de *U* = 20 kV. Leur intensité augmente au fur et à mesure que la haute tension du tube augmente. La haute tension du tube n'a par contre aucune influence sur la position des raies caractéristiques (voir tab. 1).

b) Variation du courant d'émission:

Ainsi que le montre la fig. 6, le courant d'émission *I* n'influe aucunement sur la forme du spectre du rayonnement X. La position des raies caractéristiques reste inchangée (voir tab. 2). Du reste, l'intensité du spectre de freinage et des raies caractéristiques augmente proportionnellement au courant d'émission (voir tab. 3 et fig. 7). Des écarts de la proportionnalité pour des taux de comptage supérieurs à 1000 s^{-1} sont occasionnés par des effets de temps mort lors de la saisie des taux de comptage.

Bibliographie

[1] C. M. Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotopes, 7th Edition, 1978, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

© by Leybold Didactic GmbH
Printed in the Federal Republic of Germany
Technical alterations reserved